

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2023.05.001

高灵敏硅凹槽膜片型光纤 F-P 局部放电超声传感器

张丽娜¹, 黄烽¹, 汪良杰¹, 李群², 郝宝欣³, 王廷云¹

(1. 上海大学(特种光纤与光接入网重点实验室), 上海 200444;

2. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103;

3. 国网江苏省电力有限公司, 江苏 南京 210024)

摘要:文中设计并制备了一种硅凹槽膜片型光纤法布里-珀罗(Fabry-Perot, F-P)超声传感器,用于电力设备局部放电检测。采用有限元软件优化设计传感膜片的凹槽参数,与传统圆形膜片相比,硅凹槽膜片的静态灵敏度提升4.09倍且谐振频率基本不变。通过耦合效率修正传统双光束干涉模型,研究F-P腔长对传感器干涉光谱对比度的影响,以提升传感器的声压灵敏度。利用微机电系统(micro-electro-mechanical system, MEMS)制备硅凹槽膜片,其凹槽直径为829.44 μm ,厚度为2.09 μm ,F-P腔长为163.600 μm 。在谐振频率61.5 kHz处,传感器声压灵敏度可达357.78 mV/Pa,并结合气体绝缘开关(gas insulated switchgear, GIS)局部放电缺陷模型对传感器性能进行验证。实验结果表明,文中所制备的光纤F-P超声传感器具有声压灵敏度高、实时性好、超声信号检测能力强等优点。

关键词:光纤传感器;法布里-珀罗(F-P);凹槽膜片;微机电系统(MEMS);局部放电;超声检测

中图分类号:TM835

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2023)05-0002-08

0 引言

局部放电是由电气设备中的毛刺、裂纹和气隙等缺陷导致局部电场集中而引起的^[1],其会加速设备的绝缘劣化,引发电化学击穿,造成电力设备故障。

局部放电产生的同时会伴随光、电脉冲、电磁辐射、气体以及超声波等现象的产生,通过检测这些现象可以实现对局部放电的有效检测^[2-7]。其中,基于光纤传感的超声波检测法具有绝缘性强、抗电磁干扰、复用性好等优势,成为近年来的研究热点^[8]。光纤布拉格光栅(fiber Bragg grating, FBG)声传感器可实现对局部放电产生的超声信号检测,受栅区长度影响,其检测灵敏度较低^[9-10]。封装设计可提高FBG声传感器的灵敏度,但其对10 kHz以上频段的声信号不敏感^[11],对电力设备局部放电超声信号(集中于40~300 kHz)的检测能力较弱。Michelson干涉型光纤声传感器灵敏度高^[12],但其结构相对复杂,对解调系统要求高,难以置于电力设备内部检测局部放电超声信号。而膜片型光纤法布里-珀罗(Fabry-Perot, F-P)声传感器结构简单,易于实现微型化设计,形成内置式传感器,且能在局部放电超声信号集中频段内保持较高灵敏度,有效克服上述FBG和Michelson型声传感器的缺陷,具有广泛的应用前景。目前,关于膜片型光纤F-P

传感器的研究主要集中于传感膜片材料选取与结构优化^[13-18]两方面:金属、硅、二氧化硅、石墨烯和有机聚合物等是常用的传感膜片材料;周期性波纹^[19]膜片、悬臂梁^[20]膜片与支撑梁^[21]膜片等结构创新型膜片可进一步提高传感灵敏度,但上述结构均未考虑灵敏度提升对传感器谐振频率的影响。谐振频率降低会改变传感器的频响范围,使其无法用于超声信号的检测。

文中设计了一种应用于局部放电检测的硅凹槽膜片型光纤F-P超声传感器,并对其局部放电超声传感特性进行研究。利用COMSOL仿真软件优化设计硅凹槽膜片结构参数,建模分析F-P腔长与干涉条纹对比度关系,实现传感器谐振频率满足局部放电超声信号检测需求的同时,大幅提升声压灵敏度。采用微机电系统(micro-electro-mechanical system, MEMS)加工硅凹槽膜片,并对所制备的硅凹槽膜片型光纤F-P传感器进行声压灵敏度、频响特性及局部放电超声信号检测能力的研究。

1 光纤F-P超声传感器的设计

同轴型膜片式光纤F-P声传感器的结构示意图如图1所示,主要由传感膜片、石英套管及单模光纤(single mode fiber, SMF)构成。SMF端面和膜片内表面平行放置,并与其间的介质共同构成F-P腔。F-P腔内介质为空气,折射率默认为1。

1.1 膜片型光纤F-P传感器声波传感机理

低精细度的光纤F-P传感器的输出反射光强是

收稿日期:2023-08-08;修回日期:2023-09-18

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2022YFF0708400)

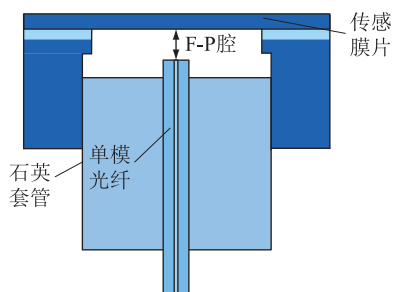


图1 同轴型膜片式光纤 F-P 传感器结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of co-axial type fiber optic F-P sensor structure based on diaphragm

关于 F-P 腔长的余弦函数^[22], 声波信号作用在传感膜片上时, 会引起膜片振动, 继而造成腔长在反射谱线性区间内振荡变化, 如图 2 所示。其中, AB 为反射光谱的线性区间, Q 为正交工作点, 当腔长在 AB 范围内变化时, 输出光强变化量与腔长变化量具有良好的线性关系, 通过测量光强变化量即可解调出腔长变化情况。

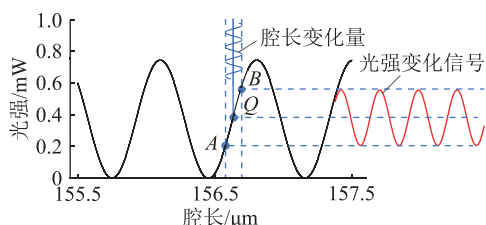


图2 光纤 F-P 传感器输出光强与腔长的关系

Fig.2 Relationship between output light intensity and cavity length of fiber optic F-P sensor

光纤 F-P 传感器的声压灵敏度主要取决于膜片形变量、干涉光谱条纹对比度及工作点位置 3 个方面。

1.2 膜片型光纤 F-P 传感器尺寸设计

1.2.1 硅凹槽膜片

当受到相同大小的声信号作用时, 膜片的形变量越大, 其腔长变化量就越大, 对应输出光强变化幅值越大, 即传感器对声信号的转换能力越强。因此, 增强膜片在声压激励下的形变量是一种提升膜片型光纤 F-P 传感器声压灵敏度的有效方法。

当膜片受声波激励时, 其中心点将产生最大的形变^[23], 因此仅减小膜片中心厚度, 形成凹槽结构, 可在不影响膜片一阶谐振频率的情况下, 实现其静态压力灵敏度的提升^[24]。凹槽膜片的结构示意图如图 3 所示, R 、 H 分别为膜的半径和厚度; r 、 d 分别为凹槽的半径和深度。

局部放电产生的声信号频率范围较大, 为避免环境中声振动噪声对检测结果造成影响, 应用于局部放电检测系统中的超声传感器检测频率一般取

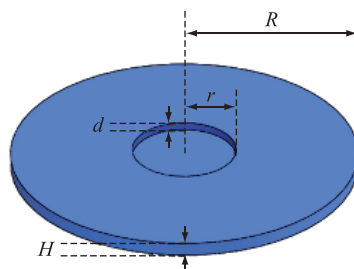
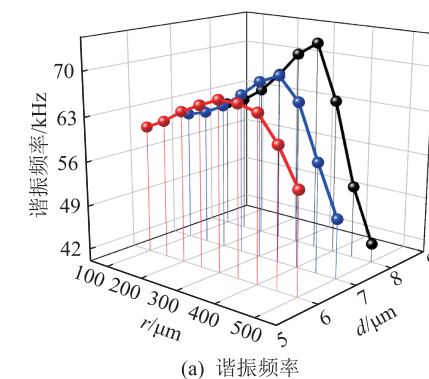


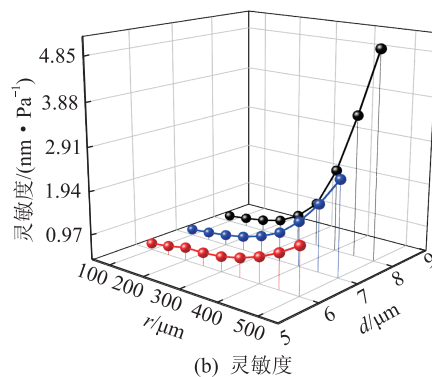
图3 凹槽膜片的结构

Fig.3 Structure of the grooved diaphragm

40~300 kHz^[25]。基于此, 文中设计的硅圆形膜片的半径和厚度分别为 825 μm 和 10 μm , COMSOL 仿真得到无凹槽膜片的谐振频率为 60 kHz, 静态压力灵敏度为 0.482 nm/Pa。调整凹槽尺寸, 膜片的静态压力灵敏度和谐振频率随凹槽尺寸的变化关系如图 4(a)、(b) 所示, 膜片谐振频率随凹槽半径的增加先增后减, 凹槽半径为 415 μm 时, 谐振频率达到最大, 在此半径条件下, 其值随着凹槽深度的增加而进一步增大, 膜片的灵敏度随凹槽半径和深度的增加而增加。当凹槽半径为 415 μm 、深度为 8 μm 时, 硅凹槽膜片的静态压力灵敏度高达 2.444 nm/Pa, 是较传统圆形膜片提升了 4.09 倍, 谐振频率为 62.294 kHz, 与圆形膜片基本一致。



(a) 谐振频率



(b) 灵敏度

图4 凹槽膜片传感特性与凹槽结构参数的关系

Fig.4 Relationship between sensing characteristics and structural parameters of grooved diaphragm

1.2.2 传感器 F-P 腔长

光纤 F-P 传感器的声压灵敏度 S_a 可以表示为

传感器输出光信号经光电转换后的输出电压 ΔV_{out} 与输入声压 P 的比值^[26]：

$$S_a = \frac{\Delta V_{out}}{P} = \frac{\Re S \Delta L}{P} \quad (1)$$

式中： \Re 为光电探测器的增益； ΔL 为腔长变化量； S 为传感器在正交工作点附近腔长变化的条纹灵敏度，与干涉条纹对比度相关，干涉条纹对比度越大， S 越大。在 \Re 与 ΔL 固定时，光纤 F-P 传感器的声压灵敏度在 S 取最大值时达到最大。

存在光能量损耗（光由 SMF 端面出射时为发散光束，只有部分光能被膜片内表面反射后返回 SMF）的双光束干涉条纹的对比度^[27]可表示为：

$$I_{visual} = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} = \frac{2\sqrt{R_1 R_2} \eta}{R_1 + R_2} \quad (2)$$

式中： I_{max} 、 I_{min} 分别为反射光强的最大值和最小值； R_1 、 R_2 为两端面反射率； η 为耦合效率。

由式(2)可以看出，条纹对比度的大小由 R_1 、 R_2 及耦合效率 η 决定。

以下建立 3 种数学模型对膜片型光纤 F-P 传感器的光束传输与耦合特性进行分析。

(1) 均匀平面波模型。在该模型中，光功率在纤芯界面内分布均匀，光束以平面波的形式传输^[28]，当光束由 SMF 端面出射时，光束发散，其耦合效率的求解公式为：

$$\eta = \frac{\omega_0^2}{(\omega_0 + L \tan(\arcsin N_A))^2} \quad (3)$$

式中： ω_0 为高斯光束的束腰半径； L 为 F-P 腔长； N_A 为光纤的数值孔径，与 SMF 的纤芯和包层折射率相关。

(2) 高斯功率分布模型。该模型中的光束从 SMF 端面出射后以高斯光束进行发散传输^[29]，位于反射膜片中心的光功率被耦合，耦合效率可表示为：

$$\eta = \left(\frac{2\omega_0 \omega(D)}{\omega_0^2 + \omega^2(D)} \right)^2 \quad (4)$$

$$\omega(D) = \omega_0 \left(1 + \left(\frac{D\lambda}{\pi\omega_0^2} \right)^2 \right) \quad (5)$$

式中： $\omega(D)$ 为光传播距离 D 后的衍射光斑模场半径； D 为传感器的光程差，其值是光纤 F-P 腔长的 2 倍； λ 为波长。

(3) 高斯模式耦合模型。与高斯功率分布模型相同，该模型中的出射光束同样以高斯光束进行发散传输，但其耦合效率根据模式耦合计算得到^[28]，SMF 的耦合系数正比于高斯光束和基模的交叠积分，耦合效率可表示为：

$$\eta = 1 - \exp\left(-\frac{2\omega_0^2}{\omega^2(D)}\right) \quad (6)$$

当端面反射率确定时，根据 3 种模型分别计算条纹对比度与腔长的关系，结果如图 5 所示。仿真结果表明，3 种模型均存在最优腔长可使光纤 F-P 传感器的条纹对比度达到最大值 1，因此在制备光纤 F-P 传感器时，通过控制腔长即可实现声压灵敏度的提升。相较于在反射端面镀金膜来提升对比度的传统方法，腔长控制法操作简单，更易实现，且能有效避免在电力设备高场强作用下金属材料自身发生局部放电造成的安全隐患。

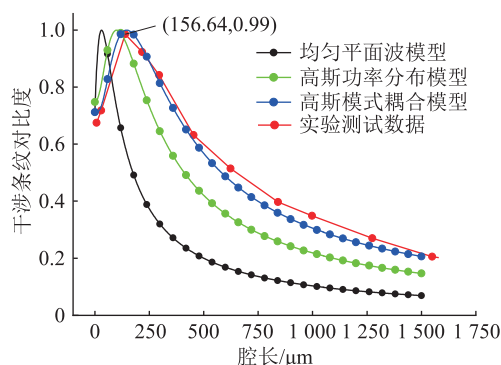


图 5 干涉条纹对比度与 F-P 腔长关系

Fig.5 Relationship between interference fringe contrast and F-P cavity length

将端面平整的 SMF（型号：G652D，纤芯折射率 $n_1 = 1.467$ ，包层折射率 $n_2 = 1.456$ ，纤芯半径 $a = 4.2 \mu\text{m}$ ）与硅凹槽膜片（反射率为 0.199 5）固定在五维精密调整架上，调整两反射端面距离，测试得到不同腔长的反射光谱信息，并利用式(1)计算得到相应的干涉条纹对比度。

测试结果如图 5 中红色点线所示，膜片型光纤 F-P 传感器的条纹对比度与腔长关系曲线和高斯模式耦合模型一致性较高，为确定传感器最优腔长提供理论基础，当腔长为 $156.64 \mu\text{m}$ 时，干涉条纹对比度最大，约为 0.99。

1.2.3 光纤 F-P 传感器工作点

当光纤 F-P 传感器的初始腔长落于非线性工作区（即图 6 中 Q_1 ）时，其反射光谱斜率较小，对应的光强变化量也较小，如图 6 中红色曲线所示，表明此腔长下的传感器声压灵敏度较低；而当 L 落于 Q 点时，反射光谱对应的光强变化率最大，所引起的光强变化量最明显。

因此，搭建光纤 F-P 传感器解调系统时，应调整光源的窄带光波长使 F-P 腔长位于正交工作点，以获得最大的声压灵敏度和测量范围。

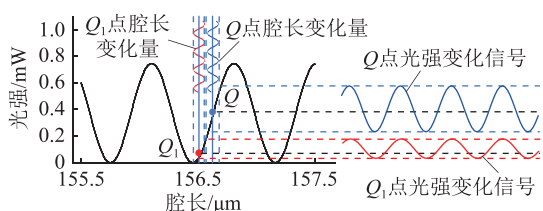


图6 传感器在不同工作点对应的光强变化

Fig.6 The change in light intensity corresponding to different working points of the sensor

2 光纤 F-P 传感器的制备

文中采用 MEMS 技术制备出硅凹槽膜片,并利用 3D 光学轮廓仪对凹槽膜片正反面进行轮廓扫描,其结果如图 7(a)、(b)所示。测量结果表明,凹槽直径为 $829.34 \mu\text{m}$,深度为 $7.91 \mu\text{m}$,反面膜片直径为 $1650.43 \mu\text{m}$,底座直径为 $1811.38 \mu\text{m}$ 。制备值与设计值误差不超过 $1 \mu\text{m}$ 。

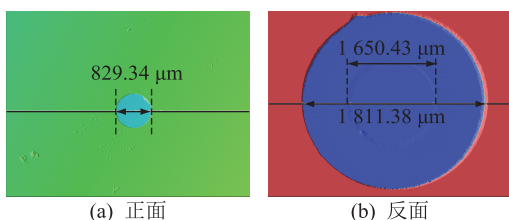


图7 凹槽型硅膜片二维扫描

Fig.7 2D scanning image of the grooved diaphragm

利用紫外胶将硅凹槽膜片固定在侧壁打孔的石英套管 1(内径 1.81 mm ,外径 2.78 mm)端面上,端面平整的 SMF 穿入石英套管 2(内径 0.135 mm ,外径 1.8 mm)形成整体,插入石英套管 1 的另一端,利用五维调整架缓慢调整 SMF 端面到膜片内表面的距离,并用光纤传感器分析仪(品牌: Micron Optics,型号: SM125)实时观察反射光谱,以获得上述仿真设计的最优腔长。最后,将紫外胶滴于石英套管 1 与石英套管 2 的连接处,并用紫外灯照射固化,形成硅凹槽膜片型光纤 F-P 超声传感器,如图 8 所示。

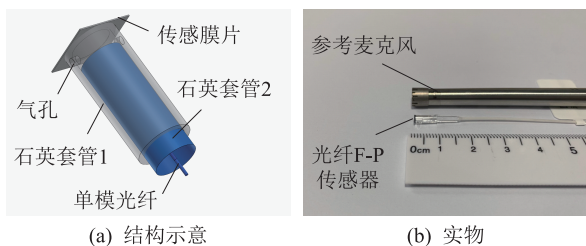


图8 凹槽膜片型光纤 F-P 传感器

Fig.8 Fiber optic F-P sensor based on grooved diaphragm

不同腔长值的传感器的干涉谱如图 9 所示,传感器腔长与目标腔长误差越小,干涉光谱的条纹对比度越大,验证了上述仿真结果的正确性。

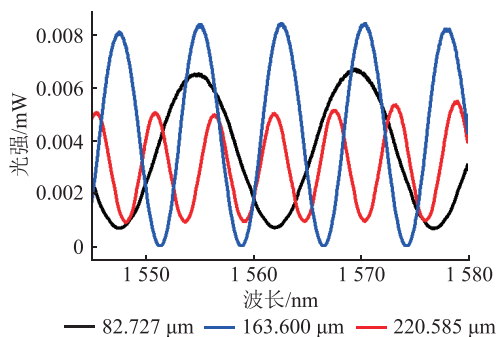


图9 不同腔长的光纤 F-P 传感器反射谱

Fig.9 Reflectance spectra of fiber optic F-P sensors with different cavity lengths

3 光纤 F-P 传感器性能测试

3.1 测试平台搭建

搭建的声学测试装置如图 10 所示,信号接收端由灵敏度为 4 mV/Pa 的电容式参考麦克风(品牌: B&K,型号: 4939-A-011)及光纤 F-P 超声传感器组成,参考麦克风与 F-P 传感器水平放置于扬声器的对称位置,用以标定当前位置处的声压值。

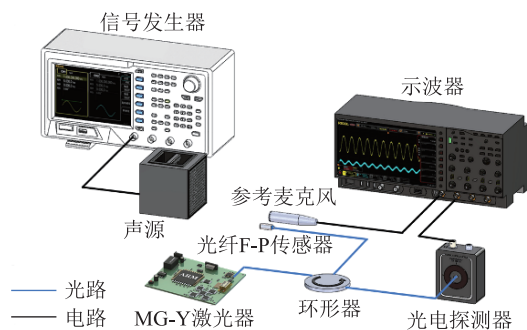


图10 声学测量实验装置

Fig.10 Experimental device for acoustic measurement

传感器解调系统由调制光栅 Y 分支(modulated grating Y-branch, MG-Y)激光器、环形器、光电探测器和示波器组成。MG-Y 激光器输出波长与 F-P 腔长匹配的窄带光,通过环形器传输到传感器。携带外界待测物理量的光信号从环形器的另一端口进入光电探测器,光电转换信号由示波器采集并与参考麦克风的电信号进行比较,以分析光纤 F-P 传感器的响应特性。

3.2 光纤 F-P 传感性能测试

对腔长不同的 2 个传感器($L_1 = 163.600 \mu\text{m}$, $L_2 = 82.727 \mu\text{m}$)进行声压灵敏度测试。调整 40 kHz 超声声源的输入电压,获得 $0.078 \sim 0.350 \text{ Pa}$ 的声压

传感器的输出电压。如图 11(a) 所示,传感器 1 和传感器 2 的输出电压与声压均呈良好的线性关系,拟合曲线的线性度 R^2 均高于 0.99。实验结果表明,在传感膜片相同的情况下,传感器 1 的声压灵敏度为 41.379 mV/Pa,与传感器 2 相比,提升 2.603 倍。2 个传感器的频响特性如图 11(b) 所示,传感器 1 在宽频范围 20~80 kHz 内的声压灵敏度均高于传感器 2。2 个传感器谐振频率相同,均在 61.5 kHz 左右,与仿真结果 62.294 kHz 略有偏差,仅有 1.27%,是由膜片制备过程中的尺寸误差造成的。

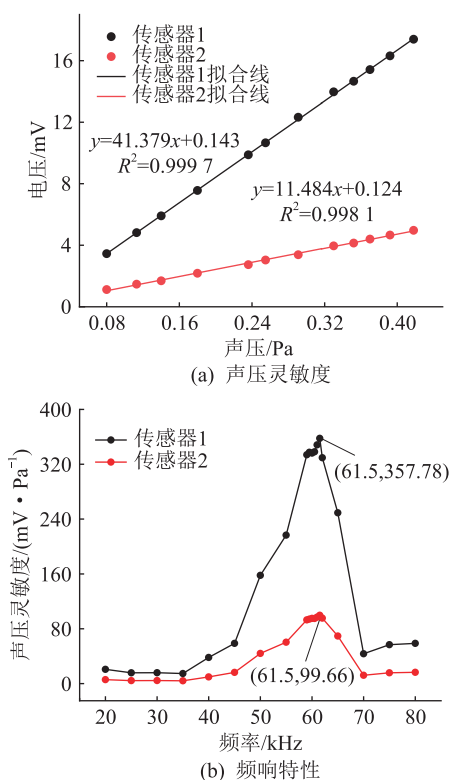


图 11 传感器的传感特性

Fig.11 The sensing characteristics of sensors

在实际应用中,传感器性能受外界环境影响严重,因此文中对硅凹槽膜片型光纤 F-P 传感器的重复性进行了研究。使用传感器对频率和强度不变的声信号进行 1 h 连续探测,每隔 10 min 记录一次传感器输出的电压峰峰值。测量结果如图 12 所示,传感器在 1 h 内的电压峰峰值的平均值为 54.162 mV,最大波动量为 0.064 mV,相对标准偏差仅为 0.046%,证明文中制备的传感器具有良好的重复性。

4 光纤 F-P 传感器的局部放电超声检测

文中根据国家电网公司企业标准《局部放电超声波检测仪技术规范》(Q/GDW 11061—2017),设计加工了 GIS 局部放电模拟罐体^[31-33]。典型的局

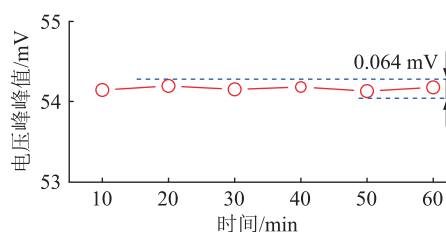


图 12 峰值电压在 1 h 内的波动情况

Fig.12 Fluctuation of the peak-to-peak voltage in one hour

部放电缺陷模型主要包括电晕放电、悬浮放电和沿面放电,技术规范中各缺陷模型的示意如图 13(a)~(c)所示,对应的缺陷模型实物如图 13(d)~(f)所示。

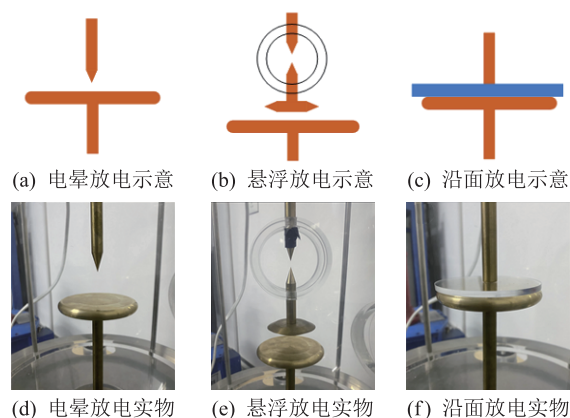
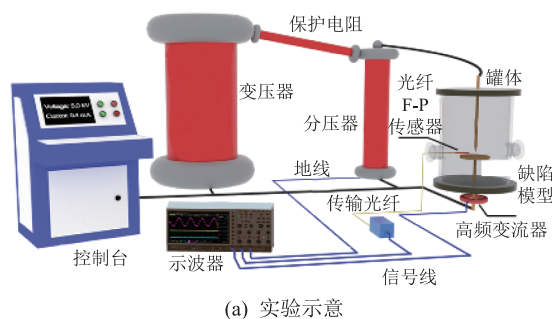


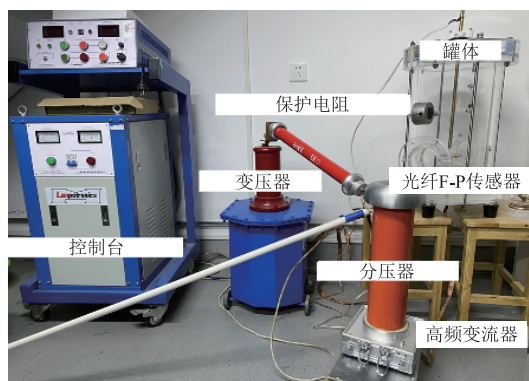
图 13 缺陷模型示意和实物

Fig.13 Schematic diagram and physical image of defect model

局部放电测试实验装置如图 14 所示,包括 GIS 局部放电模拟罐体、变压器、控制台、分压器、保护电阻、高频变流器 (high-frequency current transformer, HFCT) 和光纤 F-P 传感器。其中, HFCT 用于检测局部放电是否产生,以评估传感器的检测性能;分压器的电压比为 1 000:1,用于测量变压器产生的交流电 (alternating current, AC),作为工频相位参考;控制台用于调整变压器的电压,使 GIS 局部放电模拟罐体内的缺陷模型发生电场变化,从而产生局部放电。



(a) 实验示意

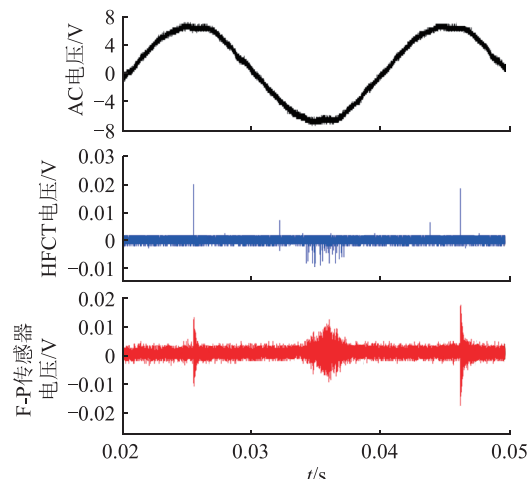


(b) 实验实物

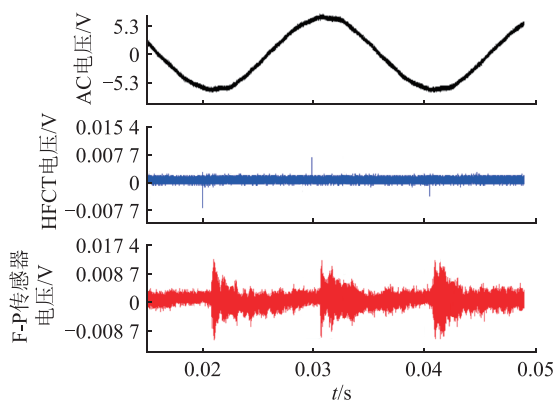
图 14 GIS 局部放电模拟装置

Fig.14 GIS partial discharge simulation device

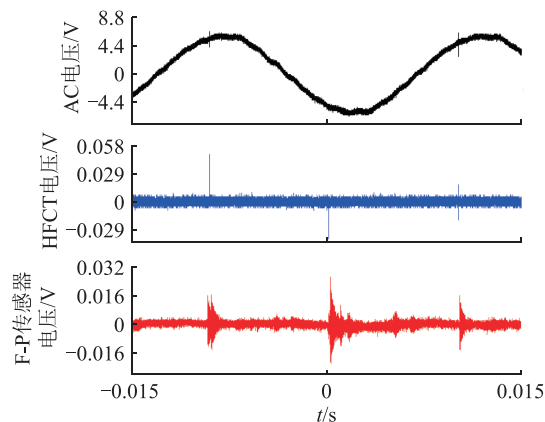
利用调整台控制变压器从 0 kV 开始缓慢升压,局部放电现象产生时, HFCT 将检测到持续时间为微秒级的脉冲电流信号,同时,光纤 F-P 超声传感器将检测到持续时间为毫秒级的衰减振荡信号。3 种放电模型的局部放电检测结果分别如图 15(a) — (c) 所示。图 15 中,黑色曲线为分压器检测到的 AC 曲线,蓝色曲线为 HFCT 检测到的脉冲电流信号,而红色曲线为光纤 F-P 超声传感器检测到的衰减振荡信号。



(a) 电晕放电



(b) 悬浮放电



(c) 沿面放电

图 15 3 种放电模型的局部放电情况

Fig.15 Partial discharge situation of three discharge models

5 结论

文中设计制备了一种高灵敏度的硅凹槽膜片型光纤 F-P 超声传感器,并进行局部放电超声传感研究。采用 COMSOL 软件仿真设计硅凹槽膜片结构参数,利用 MEMS 在硅晶片上制备了凹槽直径为 $829.34 \mu\text{m}$ 、厚度为 $2.09 \mu\text{m}$ 的硅凹槽型传感膜片,实现声传感器谐振频率固定及静态压力灵敏度提升;调整 F-P 腔长进一步提高光纤 F-P 超声传感器的声压灵敏度,在 61.5 kHz 的谐振频率下其值为 357.78 mV/Pa 。该传感器组成的局部放电超声检测系统可实现局部放电超声信号的实时监测,在局部放电检测领域应用前景广泛。

参考文献:

- [1] SONG Y X, CHEN W G, ZHANG Z X, et al. Partial discharge fiber grating ultrasonic sensor based on symmetric double diaphragm[C]//2021 International Conference on Advanced Electrical Equipment and Reliable Operation (AEERO). Beijing, China. IEEE, 2022: 1-6.
- [2] ABUBAKAR N, ABU-SIADA A. A new method to detect dissolved gases in transformer oil using NIR-IR spectroscopy[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(1): 409-419.
- [3] WANG Y B, FAN Y H, QIN S R, et al. Partial discharge localisation methodology for power transformers based on improved acoustic propagation route search algorithm[J]. IET Science, Measurement & Technology, 2018, 12(8): 1023-1030.
- [4] 杜钢,熊俊,张若兵. 基于脉冲电压及超声检测的 GIS 母线故障定位技术研究[J]. 广东电力, 2019, 32(6): 115-122. DU Gang, XIONG Jun, ZHANG Ruobing. Research on GIS bus fault location based on pulse voltage and ultrasonic detection [J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(6): 115-122.
- [5] 臧旭,马宏忠,吴金利,等. 基于振动原理的 GIS 母线导电杆松动故障分析与诊断[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49

- (9):12-20.
ZANG Xu, MA Hongzhong, WU Jinli, et al. Analysis and diagnosis of a GIS bus conductor loosening based on mechanical vibration[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(9): 12-20.
- [6] SHI M X, HAN X T, ZHANG X R, et al. Effect of disconnecter and high-voltage conductor on propagation characteristics of PD-induced UHF signals[J]. High Voltage, 2018, 3(3): 187-192.
- [7] ZHONG L, XU Y, CHEN G, et al. Use of capacitive couplers for partial discharge measurements in power cables and joints [C]//ICSD'01. Proceedings of the 20001 IEEE 7th International Conference on Solid Dielectrics (Cat.No.01CH37117). Eindhoven, Netherlands. IEEE, 2002:412-415.
- [8] 孙廷玺, 陈浩, 钱森, 等. 光纤传感技术在局部放电检测的研究进展[J]. 高压电器, 2018, 54(11): 1-8.
SUN Tingxi, CHEN Hao, QIAN Sen, et al. Progress of fiber optic sensor in partial discharge detection for power cables[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(11): 1-8.
- [9] 叶海峰, 钱勇, 刘亚东, 等. 基于光纤 Bragg 光栅的局放检测技术[J]. 高电压技术, 2015, 41(1): 225-230.
YE Haifeng, QIAN Yong, LIU Yadong, et al. Partial discharge detection technology based on fiber Bragg grating [J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(1): 225-230.
- [10] 马星河, 孔卫东, 李自强, 等. 一种基于 S_VMD 与 Sdr_SampEn 的局部放电信号去噪方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(18): 29-38.
MA Xinghe, KONG Weidong, LI Ziqiang, et al. A denoising method for a partial discharge signal based on S_VMD and Sdr_SampEn[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(18): 29-38.
- [11] LI C, PENG X B, LIU J, et al. D-shaped fiber Bragg grating ultrasonic hydrophone with enhanced sensitivity and bandwidth [J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(9): 2100-2108.
- [12] ROHWETTER P, HABEL W, HEIDMANN G, et al. Acoustic emission from DC pre-treeing discharge processes in silicone elastomer[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(1): 52-64.
- [13] LI S, ZHANG Y B, MA C Q, et al. MEMS optical fiber F-P hydrophone based on corrugated PET diaphragm [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023, 72: 1-10.
- [14] LIU L, LU P, WANG S, et al. UV adhesive diaphragm-based FPI sensor for very-low-frequency acoustic sensing[J]. IEEE Photonics Journal, 2015, 8(1): 1-9.
- [15] BHUYAN M D I, DAS S, BASITH M A. Sol-gel synthesized double perovskite Gd_2FeCrO_6 nanoparticles: structural, magnetic and optical properties [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021, 878: 160389.
- [16] CHEN L H, CHAN C C, YUAN W, et al. High performance chitosan diaphragm-based fiber-optic acoustic sensor[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2010, 163(1): 42-47.
- [17] ESAT HAYBER S, AYDEMIR U, TABARU T E, et al. The experimental validation of designed fiber optic pressure sensors with EPDM diaphragm [J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(14): 5680-5685.
- [18] HAYBER S E, AYDEMIR U. Design and simulation of a novel fungus-shaped center embossed diaphragm for fiber optic pressure sensors[J]. Optical Fiber Technology, 2021, 61: 102429.
- [19] LU X Q, WU Y, GONG Y, et al. A miniature fiber-optic microphone based on an annular corrugated MEMS diaphragm [J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(22): 5224-5229.
- [20] GUO M, CHEN K, YANG B L, et al. Ultrahigh sensitivity fiber-optic Fabry-perot interferometric acoustic sensor based on silicon cantilever [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 1-8.
- [21] YAO M, ZHANG Y X, OUYANG X, et al. Ultracompact optical fiber acoustic sensors based on a fiber-top spirally-suspended optomechanical microresonator [J]. Optics Letters, 2020, 45(13): 3516-3519.
- [22] 刘彬. 基于 Fabry-Perot 干涉仪的微型光纤声压传感器关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学.
LIU Bin. Research on key technologies of micro fiber acoustic sensor based on Fabry-Perot interferometer [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology.
- [23] KILIC O, SOLGAARD O. Fiber based photonic-crystal acoustic sensor [M]. 2008.
- [24] NIU X L, HUANG Y, ZHANG L N, et al. A sensitivity-enhanced fiber optic Fabry-perot acoustic sensor based on grooved diaphragm [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2023, 35(8): 422-425.
- [25] 黄小花, 安静, 李瑾, 等. 用于局部放电检测的光纤 Fabry-Perot 声传感器[J]. 光通信技术, 2022, 46(2): 66-70.
HUANG Xiaohua, AN Jing, LI Jin, et al. Optical fiber Fabry-Perot acoustic sensor for partial discharge detection [J]. Optical Communication Technology, 2022, 46(2): 66-70.
- [26] LI H Y, LYU J M, LI D L, et al. MEMS-on-fiber ultrasonic sensor with two resonant frequencies for partial discharges detection [J]. Optics Express, 2020, 28(12): 18431.
- [27] 王文华. 基于膜片变形的非本征法布里-珀罗干涉光纤低压传感器的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2018.
WANG Wenhua. Study on diaphragm-deformation-based extrinsic Fabry-Perot interferometric optical fiber low pressure sensor [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018.
- [28] MURPHY K A, GUNTHER M F, VENGSARKAR A M, et al. Quadrature phase-shifted, extrinsic Fabry-Perot optical fiber sensors [J]. Optics Letters, 1991, 16(4): 273-275.
- [29] KIM S H, LEE J J, LEE D C, et al. A study on the development of transmission-type extrinsic Fabry-Perot interferometric optical fiber sensor [J]. Journal of Lightwave Technology, 1999, 17(10): 1869-1874.
- [30] CHEN J Y, CHEN D J, GENG J X, et al. Stabilization of optical Fabry-Perot sensor by active feedback control of diode laser [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2008, 148(2):

- 376-380.
- [31] 舒锦宏,徐灵江,吕延春,等. 基于模糊自适应共振神经网络的电缆局部放电模式识别[J]. 浙江电力,2021,40(11): 10-15.
- SHU Jinhong, XU Lingjiang, LYU Yanchun, et al. Partial discharge pattern recognition of cables based on fuzzy adaptive resonance theory neural network [J]. Zhejiang Electric Power, 2021, 40(11): 10-15.
- [32] LEI X, JI H, XU Q, et al. Research on data diagnosis method based on acoustic spectrogram of acoustic array sensor device [J]. Global Energy Interconnection, 2022, 5(4): 418-433.
- [33] 朱嘉林,陈福彬. 气体绝缘开关设备局部放电的声压分布有限元仿真及分析[J]. 北京信息科技大学学报(自然科学版), 2016, 31(2): 18-23, 28.

ZHU Jialin, CHEN Fubin. Finite element simulation and analysis of partial discharge acoustic pressure levels distribution in gas insulated switchgear [J]. Journal of Beijing Information Science & Technology University, 2016, 31(2): 18-23, 28.

作者简介:



张丽娜

张丽娜(1999),女,硕士在读,研究方向为光纤通信与传感(E-mail: 21721464@shu.edu.cn);

黄恽(1978),男,博士,副教授,研究方向为特种光纤、光纤通信与传感、光信号处理等;

汪良杰(2000),男,硕士在读,研究方向为光纤通信与传感。

High sensitivity fiber optic F-P partial discharge ultrasonic sensor based on a grooved silicon diaphragm

ZHANG Lina¹, HUANG Yi¹, WANG Liangjie¹, LI Qun², HAO Baoxin³, WANG Tingyun¹

(1. Shanghai University (Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks), Shanghai 200444, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China;

3. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210024, China)

Abstract: A fiber-optic Fabry-Perot (F-P) ultrasonic sensor based on grooved silicon diaphragm for partial discharge (PD) detection in power equipment has been designed and prepared. The parameters of the grooved diaphragm are optimized by finite element simulation. The static sensitivity of grooved diaphragm is 4.09 times higher than that of traditional circular diaphragm, while the resonant frequency is basically the same. The coupling efficiency is introduced to modify the traditional two-beam interference model, and the effect of the F-P cavity length on the contrast of the interference spectrum is studied to improve the acoustic pressure sensitivity of the sensor. A grooved silicon diaphragm with a grooved diameter of 829.44 μm and a thickness of 2.09 μm is prepared by the micro-electro-mechanical system (MEMS). The F-P cavity length of fabricated ultrasonic sensor is 163.600 μm . The acoustic pressure sensitivity of the sensor is up to 357.78 mV/Pa at the resonance frequency of 61.5 kHz, and the sensor performance is verified by combining with the gas insulated switchgear (GIS) partial discharge defect model. The experimental results show that the proposed sensor has the advantages of high sensitivity, good real-time performance, and strong capable of detecting ultrasonic signals.

Keywords: fiber optic sensors; Fabry-Perot (F-P); grooved diaphragm; micro-electro-mechanical system (MEMS); partial discharge; ultrasonic testing

(编辑 钱悦)